

Vorschlag eines Schichtenmodells für das Bahnsystem*

Proposal for a Railway Layer Model

Dipl.-Ing. Martin Scheidt, Braunschweig (Deutschland)

Zusammenfassung

In Bahnsystemen sind Fahrplan und Infrastruktur die Schlüssel zur Befriedigung der Verkehrsnachfrage. Beim Gestalten der Infrastruktur muss eine passende, praktikable Kombination aus Fahrplan und Gleistopologie gefunden werden, welche die komplexen Anforderungen aus Nachfrage und Bahnbetrieb erfüllt. Daher besteht ein immenses Interesse an einer automatischen Erzeugung von Fahrplänen und Gleistopologien. Dieser Beitrag beschreibt ein Modell mit Abstraktionsschichten, welches eine automatische Erzeugung unterstützen könnte. Es werden verschiedene State-of-the-Art Modelle kombiniert, so dass alle Aspekte des Bahnbetriebs berücksichtigt werden. Auf diese Weise wurde ein Schichtmodell entwickelt, das sich am OSI Referenzmodell orientiert und aktuelle Entwicklungen, wie das UIC RailTopoModel, berücksichtigt. Mögliche Anwendungen eines solchen Schichtenmodells sind die automatische Generierung von Fahrplänen und Gleistopologien, sowie die Bereitstellung von Eingangsdaten für synchrone Bahnsimulationen zwecks Kapazitätsbewertung und eine durchgängige Darstellung der Infrastruktur und deren Abhängigkeit vom Bahnbetrieb.

Abstract

In railway systems, timetables and infrastructure are key components for satisfying transport needs. In order to find a feasible configuration that satisfies the complex set of requirements, numerous timetables and track topologies have to be evaluated. Therefore, there is an immense need for automatic timetable and track topology design. This paper discusses the concept of creating abstraction layers based on a data model to support and simplify these designs. It uses different state-of-the-art models and combines them so that all aspects of railway operation are included. Using this method, a layer model has been developed that was inspired by the OSI Reference Model and takes current developments such as the UIC RailTopoModel into consideration. Possible applications of such a layer model are the automatic generation of timetables and track topologies, as well as entrance data for synchronous railway simulations for capacity evaluation, and a universal representation of a railway network.

1 Einführung

Für Forschung im Bereich Bahnbetrieb auf Bahnnetzen, muss eine beträchtliche Datenmenge von Infrastruktur und Fahrplänen analysiert werden. Die Verwaltung und Organisation dieser Daten sind der Schlüssel zum Erfolg solcher Studien. Dieser Artikel beschreibt einen Vorschlag für ein holistisches Modell zur Verarbeitung dieser Daten. Das Modell umfasst verschiedene Aspekte eines Bahnsystems, von der Infrastruktur bis hin zu den darauf angebotenen Transportleistungen, um eine möglichst vollständige Darstellung eines Bahnsystems zu erhalten. Dazu wurden mehrere bestehende

Modelle untersucht und in einem Modell kombiniert. Viele dieser bereits vorhandenen Modelle betonen verschiedene Aspekte von Eisenbahnsystemen. Die Hauptaufgabe besteht nun darin, das Eisenbahnsystem zu zerlegen und Aspekte zu identifizieren, damit diese in das Gesamtmodell einbezogen werden.

Im folgenden Kapitel wird auf die Motivation eingegangen und erläutert, warum ein Schichtenmodell bei der Lösung spezifischer Probleme hilfreich ist. Anschließend wird gezeigt, wie ein Bahnsystem in einzelne Komponenten unterteilt werden kann, so dass jede Komponente spezifische Funktionen erfüllt. Mit diesen Komponenten wird in Abschnitt 4

ein Bahnschichtenmodell entworfen und jede Schicht einzelnen Funktionen zugeordnet. Jede Schicht wird detailliert besprochen und, falls vorhanden, auf existierende Modelle verwiesen. Abschließend wird der Diskussions- und weitere Forschungsbedarf aufgezeigt.

2 Motivation

2.1 Hintergrund

Die Infrastruktur und der darauf angewandte Fahrplan bilden die Grundlage für

* Übersetzte und überarbeitete Fassung des 2018 erschienenen Konferenzbeitrags unter dem Titel "Proposal for a Railway Layer Modell" [1].

jedes Bahnsystem. Beide Elemente müssen für die Erfüllung der Verkehrsnachfrage entwickelt werden. Da beide Komponenten stark miteinander verbunden sind, führt dies zu einem Henne-Ei-Problem, d.h. sie können nicht unabhängig voneinander gestaltet werden. Ein Werkzeug zur Berechnung einer Gleistopologie auf Basis eines Fahrplans und umgekehrt könnte helfen, eine Lösung für das Dilemma zu finden. Die Berechnung eines Fahrplans aus einer gegebenen Gleistopologie ist allgemein bekannt, die Umkehrung ist jedoch kaum entwickelt.

Zuerst wird das Grundprinzip der Fahrplanung untersucht, um beide Richtungen dieser Berechnung zu berücksichtigen. Der klassische Ansatz für die Fahrplanung ist die Fahrzeitberechnung für einen bestimmten Zug (Bild 1a). Für die Berechnung eines Fahrplans müssen viele Parameter von Infrastrukturelementen und deren Verknüpfungen sowie Züge, bestehend aus Fahrzeugformationen, untersucht werden. Wenn spezifische Züge auf allgemeine Leistungsparameter reduziert werden [2] und eine konkrete Fahrpläne durch das Konzept von Systemtrassen oder Zeitfenster ersetzt wird, entsteht ein allgemeinerer Ansatz für die Fahrplanerzeugung. Dies ermöglicht wiederum die Fähigkeit, eine Gleistopologie aus einem vorgegebenen Fahrplan zu erzeugen. Das Konzept der Systemtrassen wird sogar von der europäischen Gesetzgebung durch die Trennung von Infrastrukturbetreibern und Eisenbahnunternehmen durchgesetzt (Bild 2). Diese Reduktion auf eine Systemtrasse betont die Transformation (φ) und kann auf die gesamte Menge von Gleistopologien und Fahrplänen ausgedehnt werden (Bild 1b). Es gibt zwei Transformationsrichtungen: φ_1 von der Menge Gleistopologien (Y) zur Menge Fahrpläne (T) und φ_2 von der Menge Fahrpläne (T) zur Menge Gleistopologien (Y).

2.2 Von der Gleistopologie zum Fahrplan

Die Transformation von Y zu T (φ_1) ist der Fahrplanungsprozess; eine bestimmte Gleistopologie kann mehr als einen entsprechenden Fahrplan haben und ein bestimmter Fahrplan könnte auf mehr als eine Gleistopologie passen. Dies deutet darauf hin, dass die mathematischen Lösungen für die Transformation φ_1 groß ist.

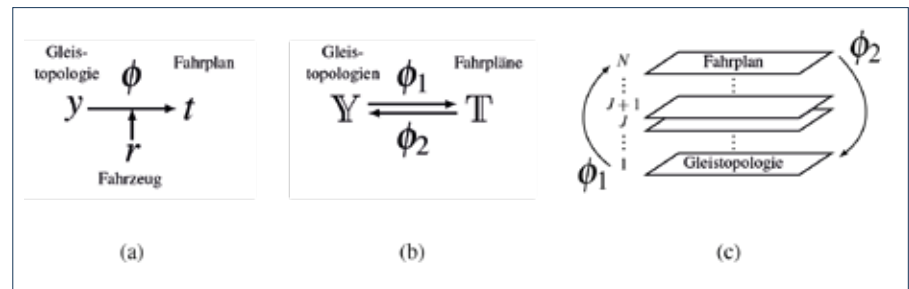


Bild 1: Übergänge. (a) Klassische Fahrzeitberechnung; (b) Generischer Ansatz; (c) Schichten, um den Lösungsraum zu reduzieren

Viele Lösungen sind jedoch aus Sicht der Eisenbahn nicht plausibel. Eine spezielle Transformation von einer Gleistopologie zu einem oder mehreren Fahrplänen ist Stand der Technik und bereits in vielen bahnbezogenen Software-Werkzeugen implementiert.

2.3 Vom Fahrplan zur Gleistopologie

Die formale Transformation von T zu Y (φ_2) ist weder allgemein bekannt noch wird sie verwendet. Diese Transformation könnte nützlich sein, um Infrastrukturmängel für die Planung integraler Taktfahrpläne zu ermitteln. Genau wie bei der Transformation φ_1 führt die Transformation φ_2 zu einer Vielzahl von Lösungen, von denen nur einige für die Bahnanwendung geeignet sein werden. Dies zeigt, dass die primäre Aufgabe darin besteht, den Lösungsraum zu reduzieren.

2.4 Reduzierung des Lösungsraumes

Der Lösungsraum der Transformation φ_1 wird wesentlich durch die Eigenschaften einer Fahrplantrasse bestimmt und wird von bahnbetrieblichen Beschränkungen festgelegt. Der Lösungsraum der Transformation φ_2 wiederum ist nicht speziell

bestimmt und muss eingeschränkt werden. Für diese Einschränkung kann eine umgekehrte Berechnung der Fahrdynamik angewendet werden, was jedoch aufgrund der komplexen mathematischen Natur möglicherweise nicht praktikabel ist.

Eine andere Idee ist, die Transformation φ_2 weiter einzuschränken, indem Abstraktionsschichten zur Reduzierung der Komplexität eingeführt werden. Hier werden diese Abstraktionsschichten bestimmt, indem der Transformation φ_1 gefolgt und daraus ein Schichtenmodell gebildet wird (Bild 1c). Ein Schichtenmodell hat bestimmte Vor- und Nachteile. Die Hauptschwäche der Schichten besteht in der Entstehung zusätzlicher und möglicherweise unnötiger Formen der Abstraktion, inklusive gegenseitiger Abhängigkeiten. Der Vorteil liegt darin, einen Aspekt einer einzelnen Schicht einfacher darstellen zu können, als es im Gesamtzusammenhang möglich wäre. Diese ebenenbasierte Einfachheit hilft, Aspekte einer Schicht zu optimieren, ohne den Gesamtkontext zu verlieren. Die Verknüpfung zwischen den Schichten kann auch dazu beitragen, bisher unbeachtete Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist ein Schichtenmodell ideal für ein großes System mit gemischten niederen und höheren Funktionen [4].

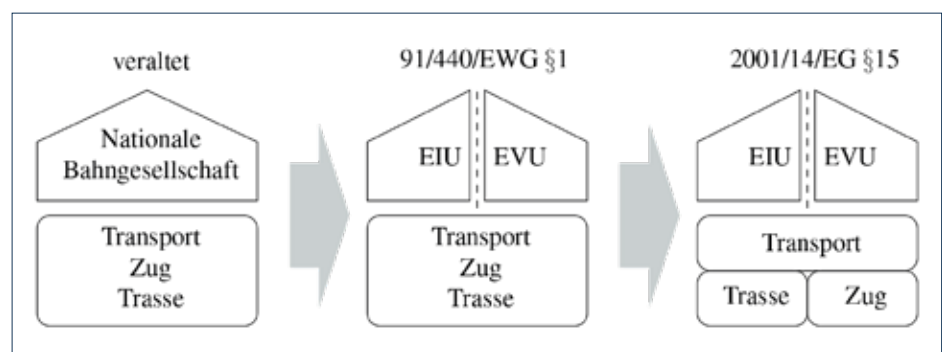


Bild 2: Trennung der nationalen Eisenbahn nach europäischem Recht in Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) und Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) basierend auf [3]

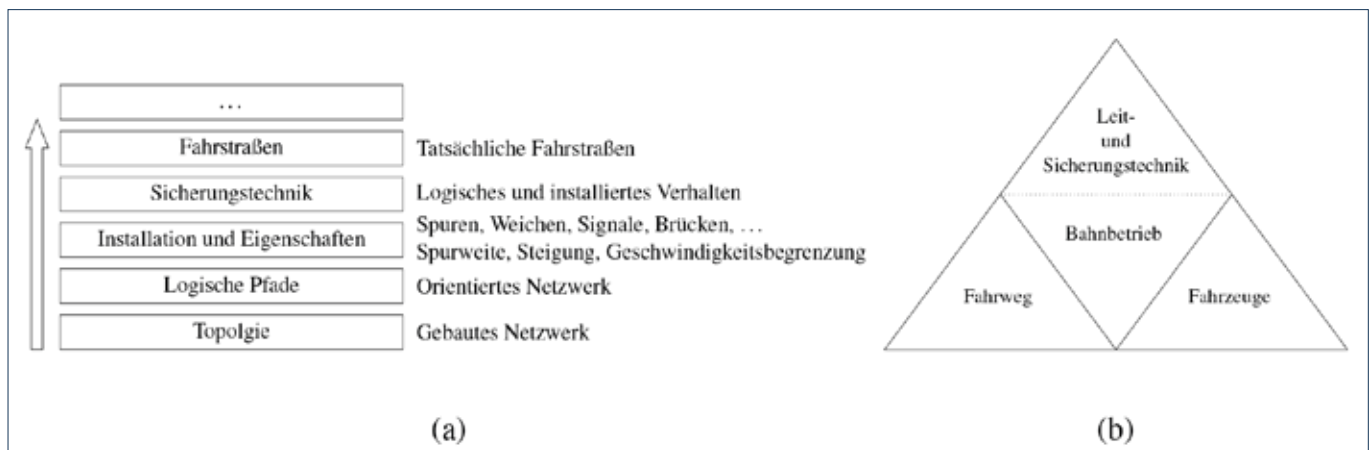


Bild 3: (a) Vorgeschlagene Schichten des UIC RailTopoModel [6]; (b) Bahnsystem nach [7]

Nach [4] sollte die Zerlegung eines Systems durch die Strukturierung des Systems in eine angemessene Anzahl von Funktionen umgesetzt werden. Dann sollte die unterste Funktionsebene (1) des Systems als Basis für das Schichtenmodell dienen. Zwischenschritte werden als Schicht J bezeichnet und bauen aufeinander auf ($J+1$), bis die oberste Funktionsebene N erreicht wird. Das OSI-Modell repräsentiert auf diese Weise ein klassisches Beispiel für die Aufteilung der Funktionsebenen [5].

Der UIC RailTopoModel-Standard erwähnt kurz ein Schichtenmodell und fordert auf, dieses zu erweitern und weiterzuentwickeln (Bild 3a) [6]. Jedoch zielt das UIC RailTopoModel nur auf die Gleis-topologie eines Schienennetzes ab, nicht aber auf den Fahrplanaspekt und kann daher die höheren Verkehrsaspekte von Bahnsystemen nicht abdecken. Auch andere aktuelle Modelle aus dem Stand der Technik konzentrieren sich auf einzelne Funktionen. Daher kann eine Kombination dieser Modelle zu einem umfassenden Modell führen. Um das Bahnsystem mit einer ganzheitlichen Sicht zu modellieren, muss es zunächst in verschiedene Funktionen zerlegt und analysiert werden. Orientiert an der Transformation φ_1 bedeutet das: Beginnend bei der grundlegenden geografischen Beziehung und endend mit der Befriedigung der Verkehrsnachfrage.

3 Zerlegung des Systems Bahn

3.1 Komponenten

[7] beschreibt das Bahnsystem mit vier Hauptkomponenten: dem Fahrweg, den

Fahrzeugen, dem Bahnbetrieb und der Leit- und Sicherungstechnik (Bild 3b). Alle diese Komponenten erfüllen Funktionen innerhalb des Systems. Es ergeben sich sechs Funktionsschichten aus den Komponenten: Netzwerk, Zugang, Transport, Sicherheitsvorschriften, Verkehrsregelung und Sicherungstechnik. Der Fahrweg erzeugt ein physisches Netzwerk von Gleisen, inklusive des Zugangs zu diesem Netzwerk. Das Rollmaterial ermöglicht den Transport auf dem Schienennetz. Der Bahnbetrieb implementiert durch Betriebsvorschriften und -verfahren Sicherheitsvorschriften und Verkehrsregelung. Die Zugsteuerung und -sicherung wird durch Sicherungstechnik sichergestellt. Diese Komponenten und ihre Funktion bilden das Gesamtsystem, indem diese einzelnen Schichten zugeordnet werden.

3.2 Ordnen der Komponenten

Es ist notwendig, die Beziehung und die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Schichten zu identifizieren, um die Schichten einzuordnen. Zu identifizieren sind die Dienste, welche von der Schicht J bereitgestellt werden und anschließend von der darüberliegenden Schicht $J+1$ verwendet werden.

Basierend auf dem UIC RailTopoModel wird zunächst die Topologie als Basis des Modells festgelegt. Die Topologie wird von der Netzwerkschicht bereitgestellt und repräsentiert physische Verbindungen und Attribute wie Geschwindigkeit, Radius, Gradient, Koordinaten und assoziierte Objekte. Diese Attribute sind, mit Ausnahme des Geschwindigkeitsprofils (Abschnitt 4.3), weitgehend unabhängig von einem bestimmten Zug oder ei-

ner bestimmten Trasse. Daher werden für die Netzwerkebene zwei Schichten vorgeschlagen, um die fahrstraßenbezogenen Attribute aus der Topologie zu entfernen und Informationen für Fahrzeitberechnung zu kombinieren. Diese zwei Schichten sind: eine *physikalische Schicht* mit grundlegenden Eigenschaften und Verbindungen für die Topologie und eine *Fahrzeitschicht* mit Geschwindigkeitsbeschränkungen und Streckenwiderständen für die Fahrzeitberechnung.

Die zulässige Geschwindigkeit aus der Fahrzeitschicht muss an benutzende Züge übermittelt werden. Diese Sicherungsfunktion der Geschwindigkeitsbeschränkungen wird durch Zugbeeinflussung gewährleistet. Weitere Sicherungsfunktionen für beweglichen Fahrweegelemente und Blockbedingungen werden von der Stellwerksebene bereitgestellt. Daher werden die Sicherungsfunktionen in einer *Sicherungsschicht* kombiniert und über die Fahrzeitschicht platziert.

Als Nächstes muss die Verkehrsregelungsebene etabliert werden, da die Sicherungsschicht Blöcke und eine damit mögliche konkurrierende Belegung dieser Blöcke schafft. Das Hinzufügen einer *Ressourcenschicht* kann ein Warteschlangennetzwerk bilden und mit der Funktionalität der Disposition eine Deadlock-Prävention gewährleisten.

Auf der Ressourcenschicht können Trassen mit der Sperrzeittheorie erstellt werden. Diese Trassen mit dazugehöriger Sperrzeit werden für den Transit von Zügen zwischen vorgesehenen Halteplätzen und schließlich zum Erstellen von Fahrplänen verwendet. Der Nutzen einzelner Trassen hängt von deren Intervall, Haltemuster und den Zugang zu

Halteplätzen ab. Es wird eine *Transitschicht* vorgeschlagen, um Trassen zu verwalten.

Mit den bereitgestellten Trassen aus der Transitschicht können dann Bahnverkehre geplant und betrieben werden. Diese Dienstleistungen werden genutzt, um den Transportbedarf von Personen oder Gütern zu decken. Daher wird zusätzlich eine *Transportschicht* eingeführt, um die Optimierung von Transportketten zu ermöglichen.

Es fehlen noch die Sicherheitsvorschriften aus dem Abschnitt 3.1, daher wird eine umfassende *Basisschicht* unter allen vorherigen Schichten platziert, um Regulationsregeln aus den Sicherheitsvorschriften zu erfassen. Diese Basisschicht wird auch dazu verwendet andere Metainformationen wie das makroskopische Netzwerk, den Betreiber und die Eigentümer aufzunehmen.

Die *Tabelle 1* zeigt die Zusammenfassung aller Schichten mit Nummer, Inhalt und Aufgaben. Dieses Modell stellt ein relaxiertes Schichtsystem dar, d.h. es gibt keine restriktive Beziehung zwischen den Schichten. Jede Schicht kann die Dienste aller darunter liegenden Schichten nutzen, nicht nur die Dienste der unmittelbaren unteren Schicht [4]. So stellt beispielsweise die Fahrzeitschicht Geschwindigkeitsinformationen nicht nur der Sicherungsschicht zur Verfügung, sondern auch der Transitschicht, damit diese Trassen berechnen kann. Jede Schicht wird im Abschnitt 4 näher erläutert und ein vollständiges Beispiel findet sich in *Bild 11*.

3.3 Verknüpfungselemente zwischen den Schichten

Verknüpfungselemente definieren die Beziehung zwischen den Schichten. Die meisten der Modelle teilen sich eine Verzweigung von Informationen an einer Weiche. Daher sind die primären Verbindungsknoten Weichen im Schichtenmodell.

	Name	Inhalt	Aufgabe
0	Basis	Makroskopisches Netzwerk	Regulation, Netz
1	Physikalisch	Grundlegende Eigenschaften, Verbindungen	Topologie
2	Fahrzeit	Geschwindigkeitsbegrenzung, Fahrwiderstand	Fahrzeitberechnung
3	Sicherung	Blöcke, Routen, Zugbeeinflussung	Sicherheit
4	Ressourcen	Warteschlangennetz, Dispositionsregeln	Ausnutzung
5	Transit	Trassen, Halte, Intervall	Fahrplanung
6	Transport	Linien und Verbindungen	Versand, Reisen

Tabelle 1: Schichten des Modells

Modelle für den Schienenverkehr, die auf Graphen basieren (geordnetes Paar $G = (V, E)$ mit einer Menge V von Knoten und mit einer Menge E von Kanten), unterstützen auf natürliche Weise die Struktur eines Schienennetzes. Daher werden, wo immer möglich, Graphen verwendet. Es gibt zwei Möglichkeiten, eine Weiche zu modellieren: als ein Knoten mit drei Kanten (*Bild 4b*) oder als zwei Kanten mit drei Knoten (*Bild 4c*). Beide Arten der Modellierung werden vom Schichtenmodell verwendet, um verschiedene Aspekte des Modells zu gewährleisten. Darüber hinaus reicht ein einfacher ungerichteter Graph nicht aus, um alle Eigenschaften innerhalb einer Schicht zu erfassen, daher werden bei Bedarf Graphen erweitert und angepasst.

4 Schichtenmodell für den Schienenverkehr

4.1 Basisschicht

Wie im Abschnitt 3.2 und in der *Tabelle 1* erwähnt, enthält die Basisschicht Metainformationen über Sicherheitsvorschriften und zum Eigentümer der Infrastruktur. Die Aufgabe der Schicht besteht darin, Informationen zu sammeln und diese Informationen in Bezug auf das makroskopische Netzwerk bereitzustellen. Diese Informationen beinhalten auch Namen und Registerinformationen von Betriebsstellen und deren Verbindungen.

4.2 Physikalische Schicht

Die physikalische Schicht verkörpert die tatsächliche physische Infrastruktur der Eisenbahn. Diese Schicht muss den spezifischen Einschränkungen der Spurtopologie gerecht werden. Die Einschränkungen sind:

- Richtungsabhängigkeit,
- unmögliche Kurvenfahrten und
- gegenseitiger Ausschluss.

Diese Einschränkungen ergeben sich aus drei verschiedenen Elementen: einem Signal, einer Weiche und einer Kreuzung. Das Signal ist nur in eine Richtung lesbar und hat für die andere keine Bedeutung. Bei einer Weiche ist ein Richtungswechsel nur auf der spitzen Seite möglich. An einer Kreuzung können zwei Züge, neben der Einschränkungen von Kurvenfahrten, nicht gleichzeitig passieren. *Bild 5* zeigt einen einfachen Graphen für jede entsprechende Einschränkung.

[8] überträgt die Schieneninfrastruktur auf einen einfachen gerichteten Graphen zur Darstellung von verbundenen Gleisen. Diese Modellierung beinhaltet jedoch das Problem der unmöglichen Kurvenfahrten, dass auf einer höheren Ebene der Programmlogik behandelt werden muss. [9] hingegen verwendet ein Colongraph, um dieses Problem zu lösen. *Bild 6* zeigt ein Beispieltopologie und die Abbildungen aller zuvor genannten Modelle. [9] führt

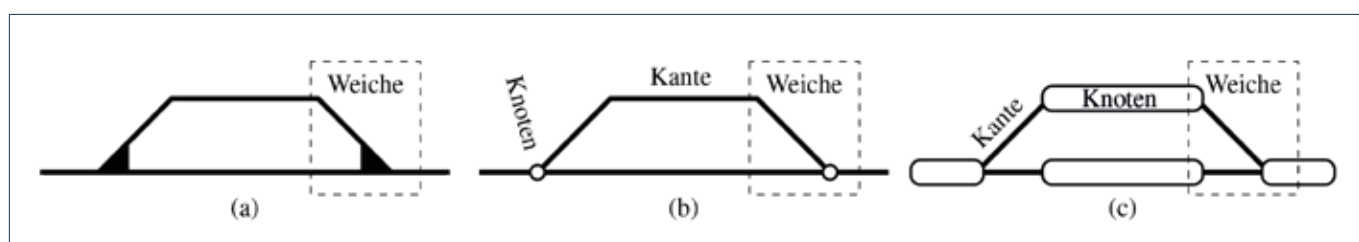


Bild 4: Graphmodellierung. (a) Beispieltopologie; (b) Weiche als ein Knoten; (c) Weiche als zwei Kanten

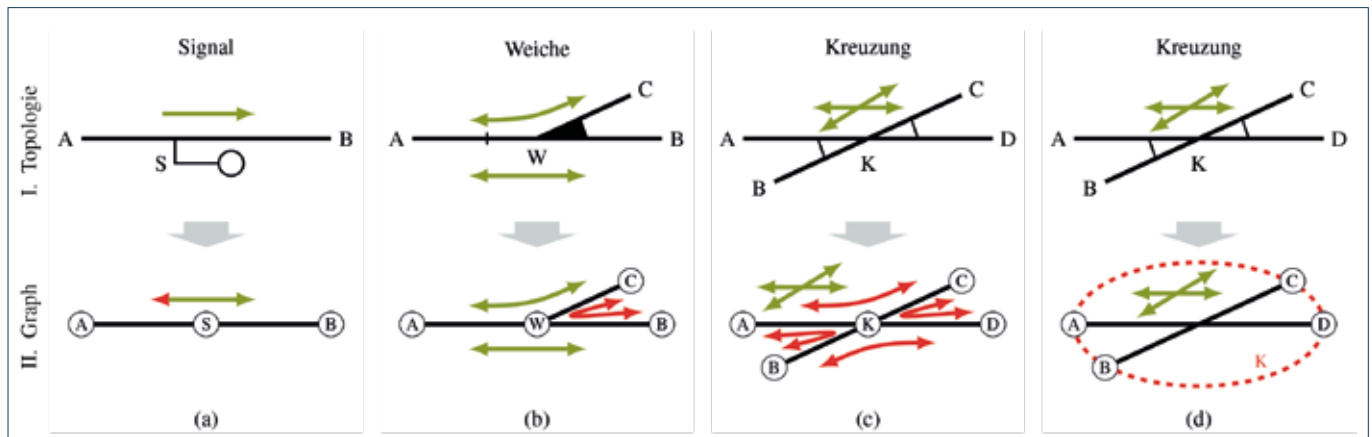


Bild 5: Einschränkungen in der Gleistopologie. (a) Richtungsabhängigkeit; (b) und (c) Unmögliche Wende; (d) Gegenseitiger Ausschluss

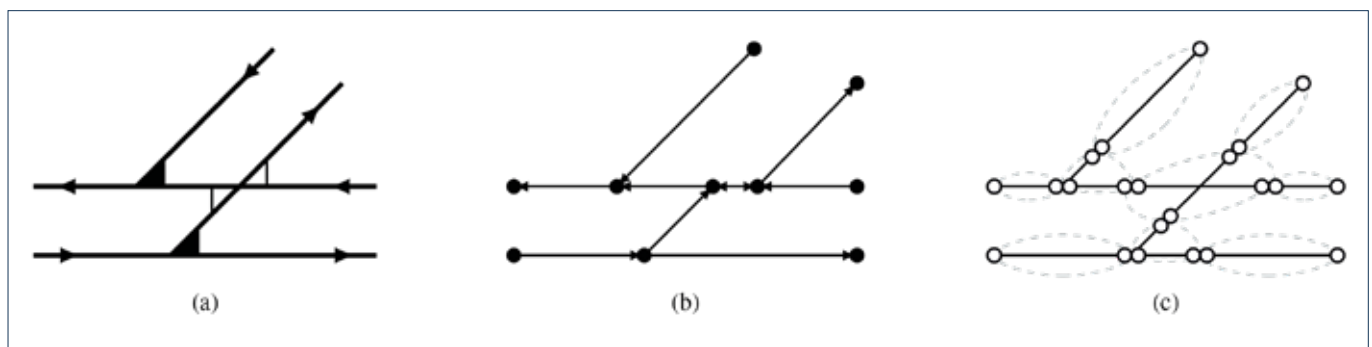


Bild 6: Ein Beispieltopologie und seine Abbildung in verschiedenen Modellen. (a) Beispieltopologie; (b) Gerichteter Graph [8]; (c) Colongraph [9]

weiterhin auch eine formale Gleistopologie ein, einschließlich einer Lösung für das Problem des gegenseitigen Ausschlusses an Kreuzungen. Da der Colongraph alle Einschränkungen der Schieneninfrastruktur bewältigen kann, eignet sich dieser gut als Modell für die physikalische Schicht.

Die physikalische Schicht beinhaltet Eigenschaften wie Spurweite, Elektrifizierung und Lademaß, die entweder auf dem Knoten oder auf der Kante eines Graphen kodiert werden können. Die Eigenschaften von Krümmung und Gradient könnten ebenfalls gespeichert werden, haben aber eine besondere Bedeutung für die Fahrzeitberechnung. Deswegen können die Krümmungen und die Gradienten entweder als Dienst für die nächste Schicht bereitgestellt oder in die nächste Schicht integriert werden.

4.3 Fahrzeitschicht

Die Fahrzeitschicht braucht infrastrukturseitig zwei Bestandteile, um Fahrzeitberechnung zu ermöglichen: Streckenwiderstand und Geschwindigkeitsbeschränkungen. Der Streckenwiderstand ergibt sich

vorwiegend aus dem Gradient und der Krümmung des Gleises. Die Geschwindigkeitsbeschränkung hingegen folgt zwei verschiedenen Einschränkungen (Bild 7). Die erste Einschränkung ist eine Folge der Krümmung; die zweite Einschränkung resultiert aus der Bewegung eines Zuges. Daraus ergeben sich zwei Profile: ein statisches Geschwindigkeitsprofil und ein dynamisches Geschwindigkeitsprofil.

Das statische Geschwindigkeitsprofil beinhaltet die maximal zulässige Geschwindigkeit an jedem Punkt, inklusive des Skalierungsproblems von mikro-, meso- und makroskopischen Modellen, beschrieben durch [10]. Das dynamische Geschwindigkeitsprofil berücksichtigt die mögliche Beschleunigungs- oder Verzögerungskurve einer Zugfahrt. Auf den vorgesehenen Trassen sollten Musterzüge verwendet werden, um die Fahrkurven festzulegen, wobei reale Züge die Fahrkurven nicht ausfahren müssen. Die Informationen des statischen und dynamischen Geschwindigkeitsprofils können entweder auf einer Kante oder auf einem Knoten kodiert werden. Zugsicherungssysteme überwachen die zulässige Geschwindigkeit, ent-

sprechend muss die Information über die Geschwindigkeit als Dienst der nächsten Schicht bereitgestellt werden.

4.4 Sicherungsschicht

[11] beschreibt die Aufgaben von Stellwerken wie folgt:

- übertragen von Geschwindigkeitsbegrenzungen für die Zugsicherung,
- Gewährleistung von Fahrstraßen und Fahrterlaubnissen, sowie
- Gleisfreimeldung.

Die Fahrzeitschicht bietet bereits Geschwindigkeitsbegrenzungen, so dass Fahrstraßen, Fahrterlaubnisse und die Gleisfreimeldung von der Sicherungsschicht umgesetzt werden können. Da es eine Vielzahl von technischen Implementierungen von Stellwerken gibt, stehen keine allgemein akzeptierten Modelle zur Verfügung. Es gibt jedoch spezifische Bedingungen, die bei jeder Implementierung erfüllt sein müssen.

Eine Fahrstraße muss zwei Aspekte sicherstellen, um ein Fahrweg für einen Zug zu sichern und freizugeben: die Block-

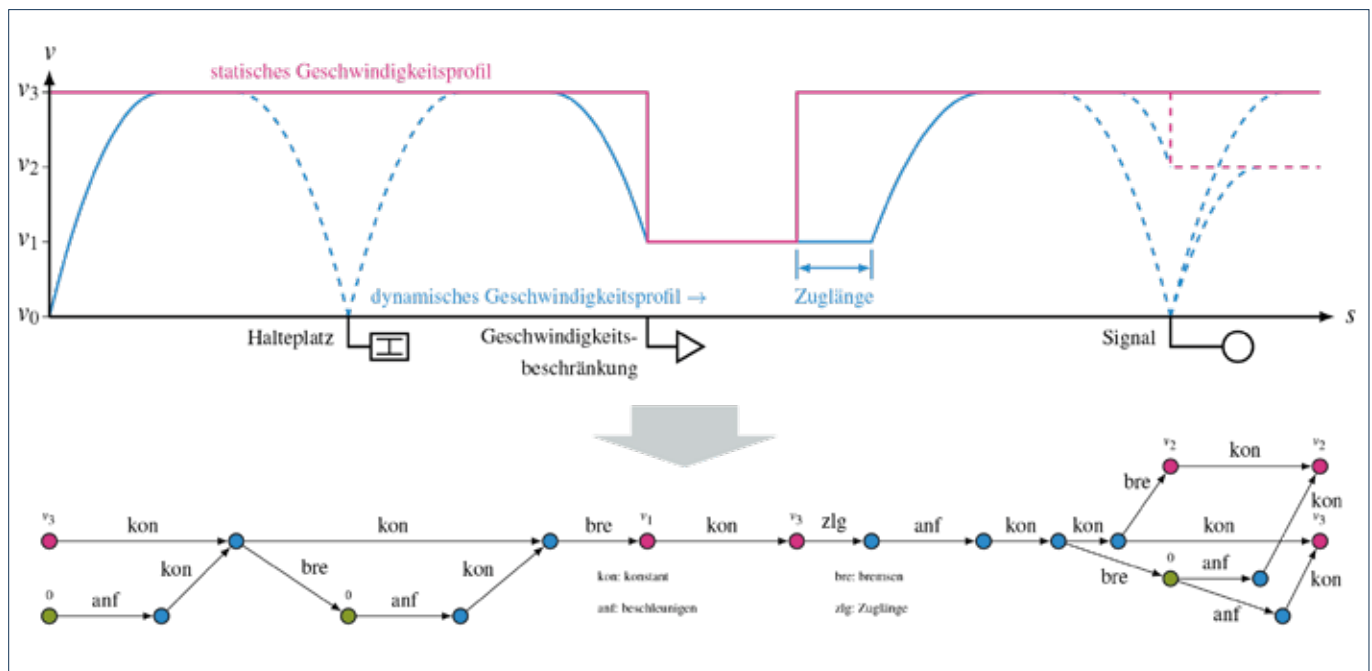


Bild 7: Statisches und dynamisches Geschwindigkeitsprofil. Vgl. [10] und [11]

funktion (Folge- und Gegenfahrtschutz) und die Verriegelung von beweglichen Fahrwegelementen in der richtigen Lage. Wie in *Bild 8a* und *Bild 8b* dargestellt, können beide Aspekte in einen Graphen überführt werden. Im Allgemeinen werden beide Fahrstraßenaspekte in einem einzigen Fahrstraßenobjekt mit verschiedenen Teilen kombiniert: ein Fahrweg, ein Durchrutschweg, einen Flankenschutzraum, einem Startabschnitt und einem Ende [11]. *Bild 8c* veranschaulicht die Teile der Fahrstraße in der topologischen Reihenfolge und Transformation zu einem Graph. Mit diesem Graph kann die Sicherungsschicht Fahrstraßen und Blöcke abbilden.

Das Stellwerk verwendet Gleisfreimeldung für die Fahrstraße, um das Freisein vom Fahrweg zu prüfen. Der Graph der Sicherungsschicht bildet die Gleisfreimeldengrenzen ab, welche ein Gleis in getrennte Gleisabschnitte unterteilen. Die nächste Schicht verwendet diese einzelnen Gleisabschnitte, um deren Benutzung durch Züge zu koordinieren.

4.5 Ressourcenschicht

Gleisfreimeldengrenzen trennen ein Gleis in verschiedene Gleisabschnitte. Gleisabschnitte können dann in ein Konnexionsgraph umgewandelt werden (*Bild 9*). [12] verwendet den Konnexionsgraph als Modell für Ressourcen (z.B. Streckenab-

schnitte, Plattformen oder Wege). Auch in [9] existieren diese Ressourcen als Äquivalenzklassen (Abschnitt 4.2). Das Konzept der Gleisabschnitte als Ressourcen kann verwendet werden, um das Problem des gegenseitigen Ausschlusses von Zugfahrten auf den Gleisabschnitten abzubilden. Damit bildet der Konnexionsgraph nicht nur die Ressourcen ab, sondern auch ein Warteschlangen-Netzwerk und bildet so die Ressourcenschicht.

Das Warteschlangen-Netzwerk in der Ressourcenschicht kann von Zugfahrten nach der Sperrzeittheorie belegt werden [13]. Die Hauptaufgabe der Ressourcenschicht besteht folglich darin, das Warteschlangen-Netzwerk bestmöglich im Einklang mit der Sperrzeittheorie auszunutzen. Darüber hinaus sind Dispositionsregeln in der Ressourcenschicht erforderlich, um eine Deadlock-Verhinderung zu gewährleisten und die stattfindenden Fahrten zu koordinieren.

4.6 Transitschicht

Trassen sind unerlässlich für die Organisation des Verkehrs auf dem Warteschlangen-Netzwerk der Ressourcenschicht. Die bereits angesprochene Konstruktion von Trassen mit der Sperrzeittheorie behandelt nicht das Problem der Variabilität der Zugfahrten. [2] erweitert die grundlegende Sperrzeit mit Leistungsparametern, um diese Variabilität der Zugfahrten ab-

zubilden. [14] zeigte bereits, dass diese Leistungsparameter zwischen Personen- und Güterzügen stark variieren. Daher sind unterschiedliche Leistungsparameter notwendig, um Trassen für verschiedene Zugklassen zu konstruieren.

Darüber hinaus zeigt [15], dass für Betriebsvarianten unterschiedliche (1) Intervallmuster sowie (2) Fahr- und Haltemuster berücksichtigt werden müssen. Beide Musterarten können für Personen- und Güterzüge in (I) feste Muster, (II) teilweise feste Muster und (III) keine vorhandenen Muster unterteilt werden. Obwohl dies zu neun Arten von Trassenklassifikationen führt, können zwei umfassende Konzepte verwendet werden, um alle Trassenklassifikationen zu berücksichtigen (*Bild 10a*).

[16] stellt für einen Fahrplan ein Konzept mit partieller Periodizität vor, das aus der maximalen Anzahl von Trassen innerhalb einer Stunde besteht. Dieses Konzept befasst sich jedoch nicht mit den Trassen, bei denen es nur im Betrieb bekannt ist, ob ein Zug vorübergehend überholt werden muss oder nicht. Dieses Problem der Überholung tritt insbesondere bei Güterzügen auf, die auf Mischverkehrsstrecken verkehren. [15] beschreibt eine Lösung für das Überholen mit dem Konzept der Schnipsel. Schnipsel sind atomisierte Vorlagen, welche für verschiedene betriebliche Situationen Fragmente für Beschleunigung, Verzögerung und konstan-

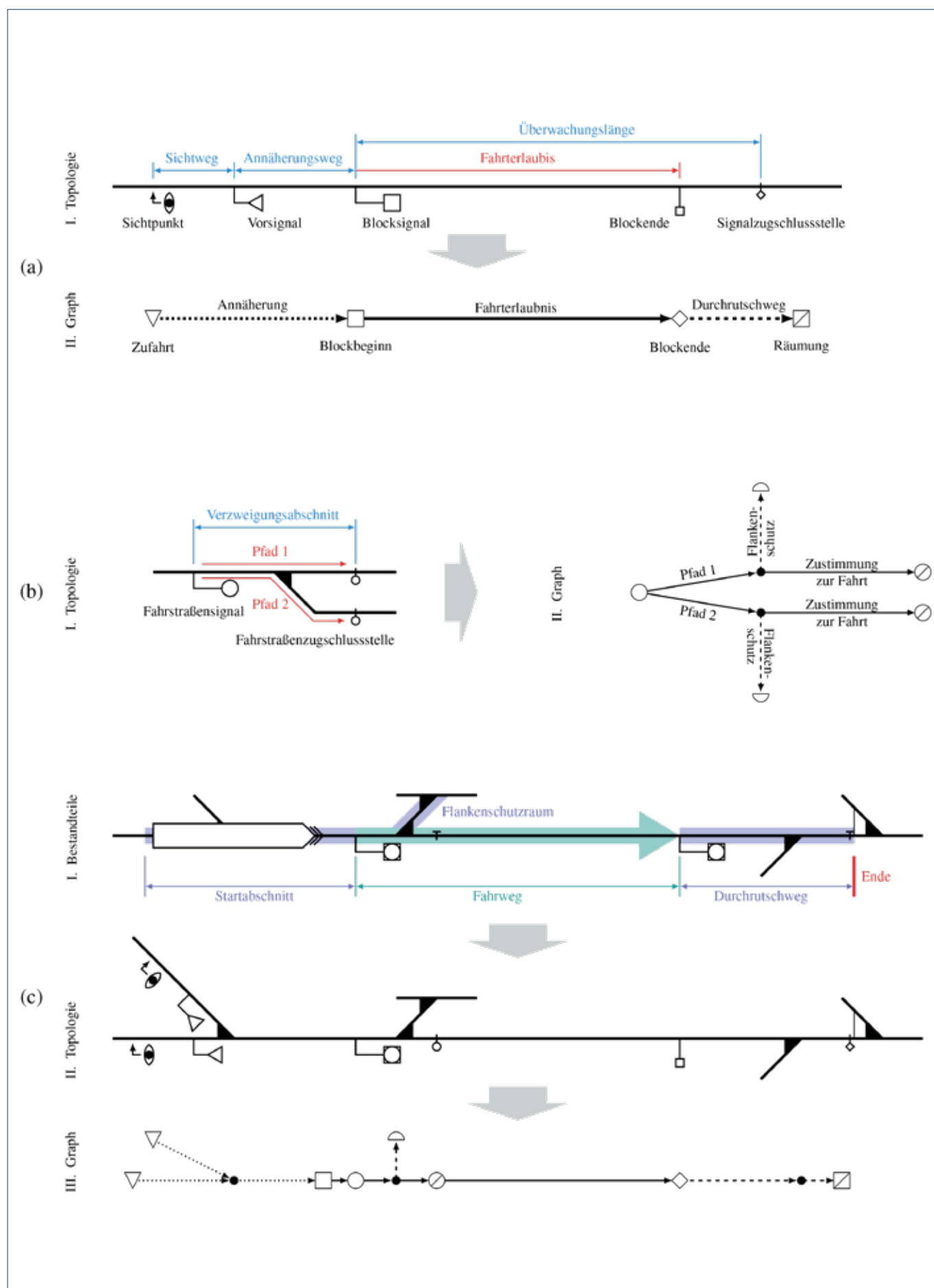


Bild 8: Fahrstraßenaspekte und ihre Transformationen. (a) Der Aspekt des gegenseitigen Ausschlusses in der Blockfunktion. (b) Der Aspekt des Fahrwegverzweigung und -sicherung. (c) Fahrstraßentransformation mit kombinierten Aspekten (I. basiert auf [11])

te Fahrt bereitstellen. Indem die geeigneten Schnipsel für eine bestimmte Situation ausgewählt werden, kann eine Trasse für eine Zugfahrt gebildet werden.

Alle Trassen und Trassenschnipsel bilden zusammen die Transitschicht. Da die Trassen aber ohne Zugänge von Reisenden und Gütern nur von begrenztem Nutzen sind, müssen Haltestellen/Bahnhöfe von Zügen explizit in der Transitschicht enthalten sein. Die Schicht könnte auch Regeln und mögliche Substitutionen für bestimmte Zugangspunkte beinhalten, falls der Betrieb gestört wird oder der Verkehr umgeleitet werden muss.

4.7 Transportschicht

Die letzte Schicht fasst die auf einem Netz laufenden Verkehre zusammen und schafft so Verbindungen in einem Fahr-

plan. Diese Schicht muss nicht nur die Zugverbindungen, sondern auch die Verbindungen für Fahrgäste, Personal, Fahrzeuge und gegebenenfalls Beschränkungen der Güterbeförderung berücksichtigen. Das von [16] vorgeschlagene Modell könnte zur Modellierung von Zugfahrten, Personenverbindungen und Abhängigkeiten zwischen Zügen verwendet werden (Abschnitt 4.6). Dieses Modell ist für die Transportschicht gut geeignet, wobei die Periodizität und die Abhängigkeiten zwischen den Zügen bereits von der Transitschicht abgedeckt sind. Jedoch ist die Periodizität für nicht-periodische Verbindungen problematisch, könnte aber nach [16] noch für einen teilperiodischen Fall verwendet werden.

Der Transport Layer kann in erster Linie zur Optimierung von Verbindungen eingesetzt werden (z.B. mit PESP oder an-

deren Algorithmen). Die Lösung kann dann wiederum auf die Trassen der Transitschicht angewendet werden.

5 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Es ist möglich ein Schichtenmodell für das Bahnsystem zu erstellen. Derzeit besteht das Schichtenmodell zum Großteil aus einer Sammlung und Verknüpfung verschiedener existierender Modelle. Die nähere Betrachtung dieser Modelle hat gezeigt, dass sie verschiedene Aspekte des Eisenbahnsystems betonen und in einer Wechselwirkung zueinander stehen (Bild 11). Für jede Schicht wurde ein bestimmter Aspekt und ein bestimmtes Modell ermittelt und zusätzlich für die Sicherungsschicht ein Prototyp eines graphenbasierten Fahrwegsicherungsmodells ge-

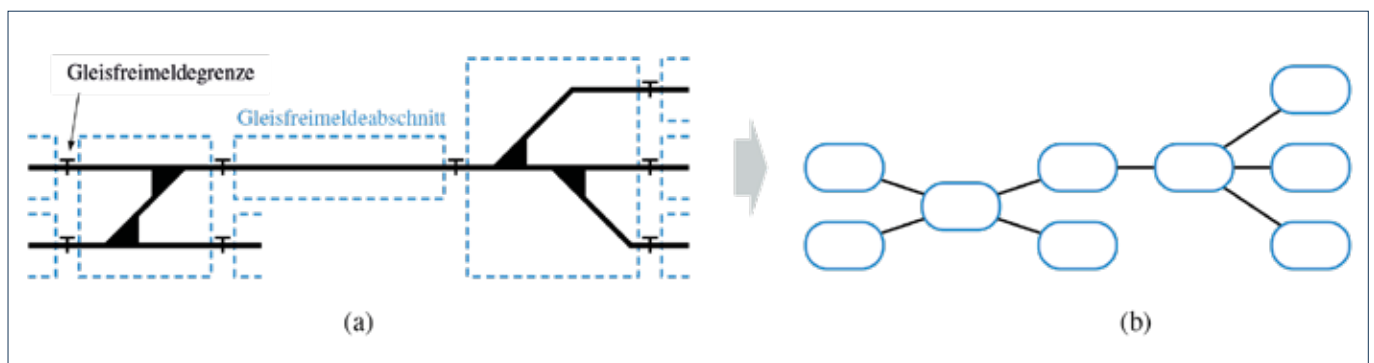


Bild 9: (a) Gleisfreimeldegrenzen teilen Gleise in Abschnitte; (b) Konnexionsgraph [12]

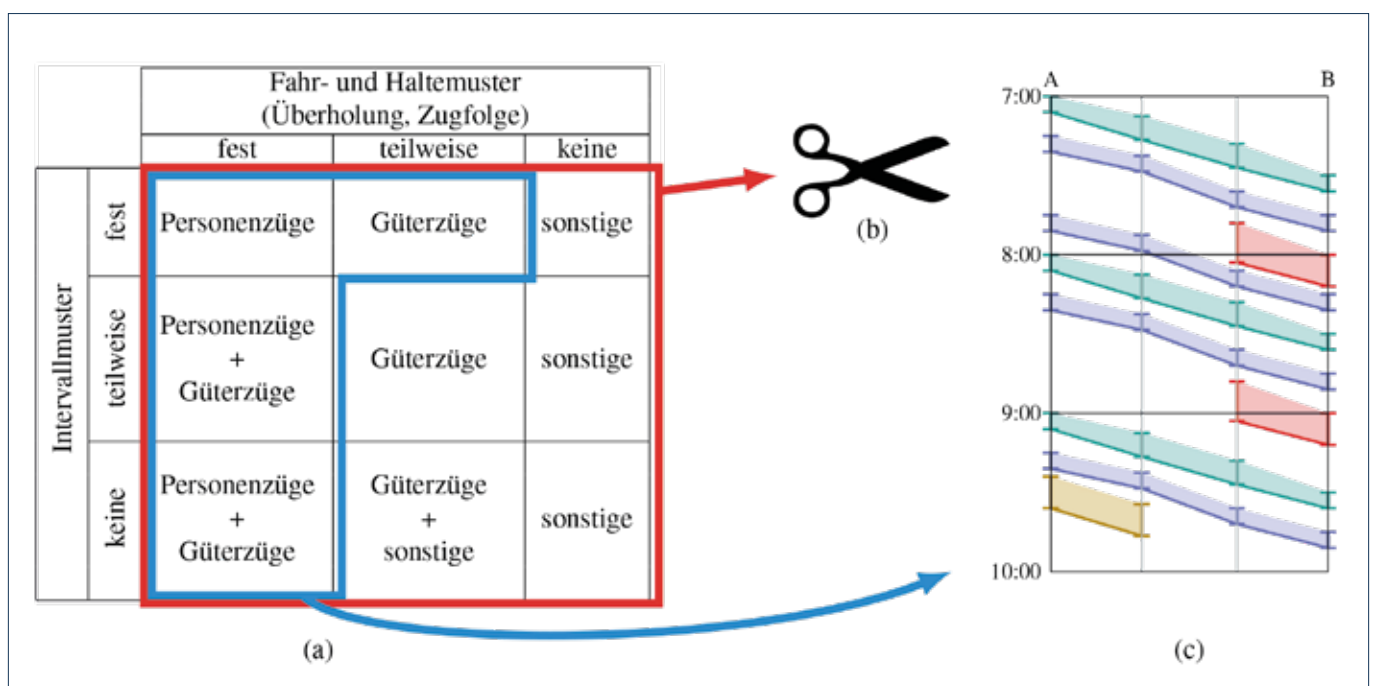


Bild 10: (a) Klassifizierungen von Trassen für Mitteleuropa; (b) Schnipsel [15]; (c) Teilweise periodischer Fahrplan [16]

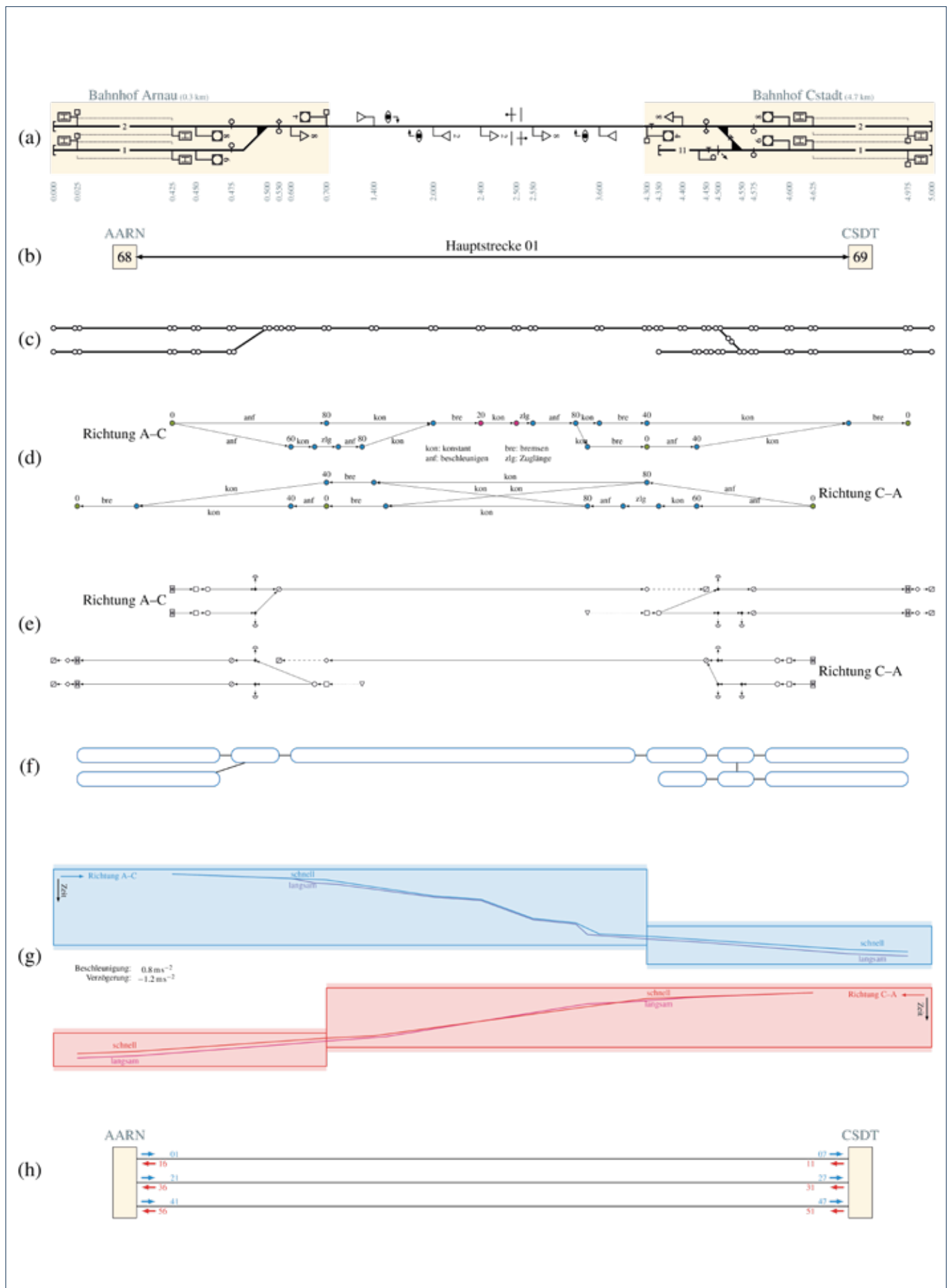


Bild 11: Beispiel Schichtenmodell. (a) Topologiebeispiel basierend [17]; (b) Basisschicht; (c) physikalische Schicht; (d) Fahrzeitschicht; (e) Sicherungsschicht; (f) Ressourcenschicht; (g) Transitschicht; (h) Transportschicht (Visualisierung basierend auf [18])

zeigt. Es werden konkrete Anwendungsbeispiele benötigt, um das Schichtenmodell weiterzuentwickeln, zu verifizieren und zu validieren. Zudem wird auch ein Nachweis der Praktikabilität benötigt. Ein strenges Schichtenmodell schien für Bahnsysteme nicht geeignet zu sein, da einige Schichten Zwischenschichten umgehen (Abschnitt 3.2). Daher entspricht das Schichtenmodell einem relaxierten Schichtensystem. Eine ideale Reihenfolge der Schichten muss überprüft werden.

Das Schichtenmodell versucht den Verkehrszweck von Bahnsystemen in die Sicht der Infrastruktur einzubeziehen, im Gegensatz zum UIC RailTopoModel, welches sich auf die Gleistopologie und Datenstruktur konzentriert. Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf, um festzustellen, ob die Architektur in Schichten den Bahnbetrieb für die Planung der Gleistopologie transparenter machen kann (*Transformation ϕ_2* ; Abschnitt 2).

(Bildnachweis: 1 bis 11, Verfasser und die in den Bildunterschriften angegebenen Quellen.)

Literatur

- [1] Scheidt, M.: Proposal for a Railway Layer Model. COMPRAIL 2018. Southampton, UK: WIT Press, 2018, S. 157–168. DOI: 10.2495/cr180141.
- [2] Medeossi, G.; Longo, G.; de Fabris, S.: A method for using stochastic blocking times to improve timetable planning. In: Journal of Rail Transport Planning & Management 1.1 (Nov. 2011), S. 1–13.
- [3] Hantak, H.: TAF TSI IM/RU Cluster - TAF TSI Working Group 10 - TAF/TSI Object Identifiers - Handbook. Techn. Ber. RailNetEurope, 2011, S. 1–204.
- [4] Buschmann, F. et al.: Layers. In: Pattern-Oriented Software Architecture, A System of Patterns. Chichester, UK: John Wiley & Sons Incorporated, Aug. 1996, S. 31–51.
- [5] Zimmermann, H.: OSI Reference Model-The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection. IEEE Transactions on Communications 28.4 (Jan. 1980), S. 425–432.
- [6] Internationaler Eisenbahnverband (UIC). UIC International Railway Standard IRS 30100 RailTopoModel. Apr. 2016.
- [7] Bosse, G.: Grundlagen für ein generisches Referenzsystem für die Betriebsverfahren spurgeführter Verkehrssysteme. Diss. TU Braunschweig, Nov. 2010.
- [8] Völz, W.: Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten spurgeführter Verkehrssysteme mittels Graphentheorie. Diss. Hannover: Lehrstuhl und Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb; Technische Universität Hannover, Juli 1976.
- [9] Montigel, M.: Formal Representation of Track Topologies by Double Vertex Graphs. Computers in Railways III. Hrsg. von T K S Murthy u. a. Washington, D.C., Aug. 1992, S. 359–370.
- [10] Radtke, A.: Infrastructure Modelling. In: Railway Timetabling & Operations. Hamburg: DVV Media Group GmbH, Eurailpress, 2014, S. 47–63.
- [11] Theeg, G.; Vlasenko, S.: Railway signalling & interlocking. DVV Media Eurailpress. Hamburg, 2009.
- [12] Gély, L.; Dessagne, G.; Pesneau, P.: A multi scalable model based on a connexity graph representation. Computers in Railways XII. Bd. 1. 114. Beijing, China, 2010, S. 193–204.
- [13] Happel, O.: Sperrzeiten als Grundlage für die Fahrplankonstruktion. ETR Eisenbahntechnische Rundschau 8.2 (Feb. 1959), S. 79–90.
- [14] Hertel, G.; Steckel, J.: Eine neue Philosophie der Fahrzeitberechnung für Zugfahrten. Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule für Verkehrswesen Friedrich List (1992), S. 104–111.
- [15] Pöhle, D.: Strategische Planung und Optimierung der Kapazität in Eisenbahnnetzen unter Nutzung von automatischer Taktfahrplanung. Diss. Hamburg, Apr. 2016.
- [16] Caimi, G. et al.: The periodic service intention as a conceptual framework for generating timetables with partial periodicity. Transportation Planning and Technology 34.4 (2011), S. 323–339.
- [17] railML.org e.V. Simple example data set (v0.7) of railway infrastructure modelled in railML 2.3 and in railML 3.1beta. www.railml.org/en/user/exampledata.html, aufgerufen am 16.02.2018.
- [18] SMA und Partner AG. Netgraph Timetable Switzerland. www.sma-partner.com/en/about-sma/downloads, aufgerufen am 16.02.2018.

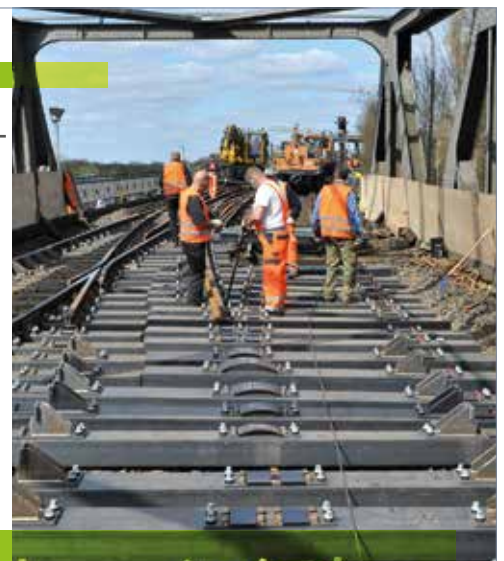


Dipl.-Ing. Martin Scheidt (35). ORCID: 0000-0002-9384-8945. Bis 2010 Studium Verkehrswesen an der TU Dresden. 2010 bis 2011 bei DB Netz AG – I.NPB 1. 2012–2016 an der TU Wien. Seit 2017 an der TU Braunschweig als Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Promotionsstudent.
Anschrift: Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung, Technische Universität Braunschweig, Pockelsstraße 3, 30106 Braunschweig, Deutschland.
E-Mail: m.scheidt@tu-braunschweig.de

STRAIL[®]WAY DIE KUNSTSTOFFSCHWELLE

➤ DIE ÖKOLOGISCHE ALTERNATIVE

- schont die Umwelt
- Lebensdauer mindestens 50 Jahre > niedrige Life-Cycle Kosten
- gute Ökobilanz durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen
- hervorragende Bearbeitbarkeit und ausgezeichnetes Handling von Gleis-, Weichen- und Brückenschwellen
- Chemikalien-, UV- und Ozonbeständig



KRAIBURG STRAIL GmbH & Co. KG > STRAIL | STRAILastic | STRAILway
D-84529 Tittmoning // Göllstraße 8 // tel. +49|86 83|701-0 // info@strail.de // www.strail.de